スポーツ科学研究, 14, 47-56, 2017 年

クロスカントリースキー競技における競技パフォーマンスに優れた選手のダイアゴナル走法のキネマティクス的特徴

Kinematical characteristics of the high-performance skier during diagonal stride technique in cross-country skiing

藤田善也 [1], 桜井義久 [2]
[1]早稲田大学スポーツ科学学術院
[2]株式会社スポーツセンシング開発企画部

Zenya Fujita[1], Yoshihisa Sakurai[2]
[1]Faculty of Sport Sciences, Waseda University
[2] Sports Sensing Co., LTD

キーワード: ストライド長, ストローク頻度, 局面, 関節角度
Key words: Cycle length, Cycle rate, Phase, Joint angle

【要　旨】

本研究の目的は, クロスカントリースキー競技中のダイアゴナル走法を対象に競技パフォーマンスに優れた選手のキネマティクス的特徴を明らかにすることであった. 15 km クラシカル競技に参加した成人男子クロスカントリースキー選手を 6 度の上り坂の地点で撮影した. 被験者は, 競技成績によって上位群と下位群に分類した. 比較の結果, 競技パフォーマンスに優れた選手は, (1)大きいストライド長を獲得していること, (2)スキーを離地させてからポールを接地させるまでの滑走時間が長いこと, (3)ポールを接地してから比較的早い段階で肘を伸展させていること, (4)プッシュオフ動作時にスキーと雪面とをすばやくグリップさせ, その後, 膝関節をすばやくかつ大きく伸展させていることが明らかとなった.

【Abstract】

The purpose of this study was to clarify kinematical characteristics of elite skiers during diagonal stride technique in cross-country skiing. Senior male cross-country skiers participated in a 15-km classical race. Diagonal stride technique of each skier was videotaped at a 6-degree uphill section. Subjects were classified into high- and low- performance groups according to its results. It was revealed that the high-performance skiers (1) achieved a longer stride length, (2) had a longer ski gliding from the ski takeoff to the next pole contact, (3) extended the elbow at an earlier point of time after the pole contact, and (4) let the ski and the snow surface gripped quickly and then extended knee joint faster and larger compared to the low performance skiers during the diagonal stride technique.

スポーツ科学研究, 14, 47-56, 2017年, 受付日:2017年5月9日, 受理日:2017年7月5日
連絡先: 藤田善也　359-1192　所沢市三ヶ島2－579－15　zenya.fujita@aoni.waseda.jp

I. 緒言

クロスカントリースキー競技では，選手はポールとスキーを利用していくつかの異なる走法で決められたコースを滑走し，その所要時間を競う．公認競技会で使用されるコースは上り坂，下り坂および平地の3要素によって構成されている．選手は，コースの起伏に合わせていくつかの走法を使い分けることで所要時間を競っており，それぞれの起伏に応じて選択した滑走技術の良し悪しが競技成績を左右する要因になるといえる．そのため，各走法の滑走技術についてバイオメカニクス的研究がされてきた．ダイアゴナル走法は，片方のポールを用いて地面を押すプッシュ動作（以下，「プッシュ動作」と略す）と反対側のスキーを用いて脚を後方に伸展させるプッシュオフ動作（以下，「プッシュオフ動作」と略す）によって推進力を獲得する走法であり，主に上り坂において使用される．ダイアゴナル走法の滑走速度とサイクル特性に着目した研究では，滑走速度の増加にはストライド長が関連すること，ストローク頻度があまり関連しないことが明らかとされている(Bilodeau et al., 1992, 1996; 藤田ら, 2013; Lindinger et al., 2009; Vähäsöyrinki et al., 2008)．また，斜度の増加に伴って滑走速度やストライド長が低下すること（Hoga and Sanbongi, 2010）が知られている．ダイアゴナル走法のキネマティクスに着目した研究では，プッシュ動作とプッシュオフ動作時に速度が増加することや股関節および膝関節の角度は一流選手では同様の変化を示すこと（Komi et al., 1982)，プッシュオフ動作時には脚伸展筋群の伸長―短縮サイクルが用いられており，先に股関節の伸展が起こり，続いて膝関節および足関節の伸展が起こることが知られている（Komi et al., 1987)．ダイアゴナル走法のキネティクスに着目した研究では，滑走速度の増加に伴い，ポール反力およびスキー反力が増加することが明らかにされている（Vähäsöyrinki et al., 2008)．またスキー反力を増加させるためには，プッシュオフ局面を短くしてスイングおよびグライド局面を長くすることや膝関節と足関節の屈曲―伸展動作を大きくすること重要であることが示されている(Lindinger et al., 2009)．これらの研究知見は，ダイアゴナル走法による滑走速度の獲得機序の理解を深めるために不可欠といえる．

1994 年に開催されたカナダ選手権男子 50 km 競技では，競技中の平均速度と上り坂のダイアゴナル走法中の速度，ストライド長との間に正の相関関係がみられることが示されているものの(Bilodeau et al., 1996)，実際の競技会においては選手の競技パフォーマンスの優劣によるダイアゴナル走法のキネマティクス的特徴の違いは明らかとなっていない．また競技会において，主に平地で使用されるダブルポーリング走法を対象とした研究では，競技パフォーマンスに優れた選手はより垂直にポールを接地していること，肘関節を一度屈曲させてから伸展させるプッシュ動作を行っていることが明らかとされている（藤田ら, 2013)．これらの研究は，競技現場での指導やトレーニングに有効な知見となるといえる．

そこで本研究の目的は，競技会において競技レベルの異なる選手のダイアゴナル走法中の滑走動作を比較することで，競技パフォーマンスに優れた選手のダイアゴナル走法のキネマティクス的特徴を明らかにすることとした．

II. 方法

1. 研究対象

本研究では，2016 年 1 月 29 日に山形県上山市の上山・坊平高原クロスカントリースキー競技場で開催された，天皇杯第 94 回全日本スキー選手権大会クロスカントリー競技の男子 15 km クラシカル種目を対象とした．同競技会の開始時刻は 10 時 30 分であった．競技中の天候は雪，雪温が摂氏 0.0 度，気温が摂氏-0.8 度，湿度が 50 %であった．競技中，気象条件は安定しており，競技前後において大きな変化はみられなかった．競技で使用されたコースは，スタート地点の標高が 989 m，標高差が 79 m，極限登高標高差が 50 m，合計登高が 543 m，全長 5.0 km であった．競技は，30 秒間隔で選手が 1 人ずつスタートするインターバルスタート方式で，同コースを 3 周して行われた．

なお本研究は，競技会前に主催，主管の団体に口頭にて研究の趣旨を説明したうえで撮影の

許可を得たうえで，選手の所属先の責任者に対し，口頭にて研究の趣旨を説明した．

2．動作の撮影

本研究では，7.0 km 地点の上り斜面（斜度 6.0 度）において，選手のダイアゴナル走法による滑走動作を撮影した．ダイアゴナル走法の 1 ストロークの定義は，右ポールの接地を開始時点とし，左ポールの接地を終了時点とした．全選手の滑走動作は，ハイスピードカメラ（WX970M, Panasonic）をコース進行方向に対して左側に固定し，毎秒 120 フレーム，露出時間 1/1000 秒で撮影した（Fig.1）．

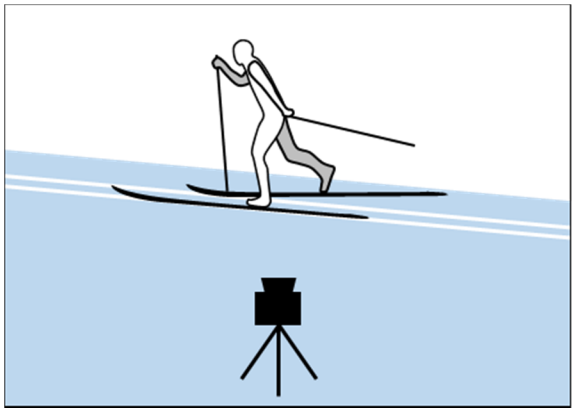

Fig.1 Set-up for videotaping

3．データ分析

分析対象者は，撮影地点を通過した 102 名のうち，公益財団法人全日本スキー連盟強化指定選手を含む競技成績の上位 10 名の中からダイアゴナル走法以外の走法を行った 1 名を除く 9 名（以下，「上位群」と略す）と，上位 9 名の平均の所要時間を 10.06 %（± 0.43 %）程上回る所要時間であった 10 名（以下，「下位群」と略す）とした．なお下位群は本競技会において 60 位前後に位置する選手であった．分析対象者は，撮影地点に引かれた同一のトラック内でダイアゴナル走法を行っていた．得られた映像は，PC に取り込み，動作解析ソフトウェア（Frame-dias V, DKH）を用いて，1 ストロークの開始地点から終了時点までの身体各部位 23 点と両ポール下端 2 点をデジタイズした．デジタイズによって得られた座標値は，競技会前にカメラに映しこませたキャリブレーションポールの長さをもとに 4 点実長換算法を用いて実長換算した．本研究では，水平方向を X 軸，鉛直方向を Y 軸とした．身体重心は，実長換算によって得られた身体各部位の座標値より，阿江[1)]の身体部分慣性係数を用いて算出した．滑走速度は 1 ストローク中の身体重心の変位を 1 ストロークに要した時間で除して算出した．滑走中のストライド長は 1 ストローク中の身体重心の XY 平面上の変位量とした．滑走中のサイクル頻度は 1 ストロークに要した時間の逆数とした．

本研究では Lindinger et al.（2009）の先行研究にならい，1 ストローク中の動作を以下の局面に分類した．ポールの動作は，ポールの接地から離地までのプッシュ局面と，ポールの離地から次の接地までのスイング局面とに分類した．スキーの動作は，スキー全体が接地してからつま先が停止するまでをグライド局面，つま先の変位が 0 となったときからスキーの接地脚の膝関節が伸展するまでをプッシュオフ屈曲局面，膝関節の伸展が開始してからスキーの一部が離地するまでをプッシュオフ伸展局面，スキーの一部が離地してからスキー全体が接地するまでをスイング局面と分類した．これらの局面について，1 ストローク中に占める割合をそれぞれ算出した．

また，本研究では，プッシュ動作によって推進力を獲得している右腕の肩関節，肘関節および右ポール，プッシュオフ動作によって推進力を獲得している左脚の股関節，膝関節，足関節について，関節角度，動作範囲および平均角速度を

分析した. 関節角度の定義は Fig. 2 に示した. なお平均角速度は, 動作範囲を動作に要した時間で除すことで算出した.

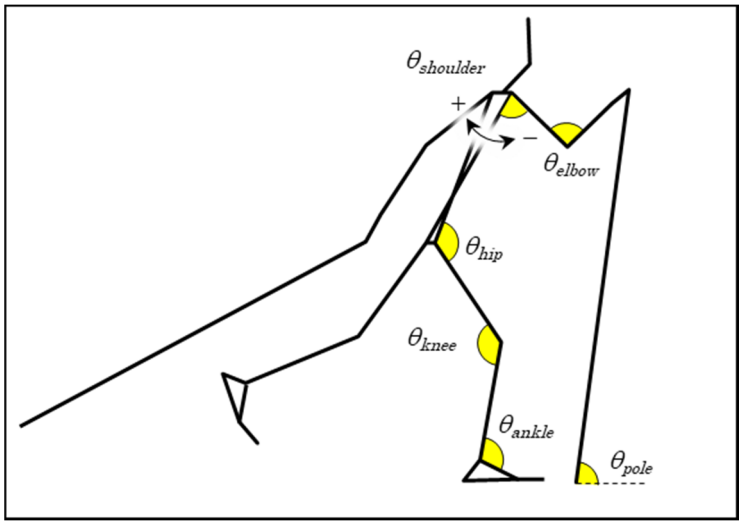

Fig.2 Definition of joint and pole angles

4. 統計処理

上位群と下位群との各パラメータの比較は, 対応のないステューデントのt検定を用い表計算ソフトウェア(Excel 2016, Microsoft)によって分析した. なお本研究では, 危険率 5 %未満を有意水準とした.

III. 結果

1. ストロークの特徴

ダイアゴナル走法中の滑走速度は, 上位群が 3.53 ± 0.19 m/s, 下位群が 3.13 ± 0.15 m/s であり, 上位群が有意に高値を示した($p < 0.001$). ダイアゴナル走法中のストライド長は, 上位群が 1.99 ± 0.12 m, 下位群が 1.70 ± 0.13 m であり, 上位群が有意に高値を示した($p < 0.001$). 一方, ダイアゴナル走法中のストローク頻度は, 上位群が 1.78 ± 0.09 Hz, 下位群が 1.84 ± 0.13 Hz であり, 有意差は認められなかった.

2. 各局面の割合

本研究で対象としたダイアゴナル走法中の 1 ストロークにおける各局面をみると, 右腕では右ポールのプッシュ動作がストローク終盤まで行われている一方で, 左腕では左ポールのスイング動作がストローク全体にわたって行われていることが示された(Fig.3). また右脚では, 右スキーのスイング動作がストローク前半に行われ, その後グライド動作が行われていた. 一方, 左脚では左スキーのグライド動作が行われ, その後, 左膝関節の屈曲を伴うプッシュオフ動作, 左膝関節の伸展を伴うプッシュオフ動作, スイング動作が順に行われていることが示された. 上位群と下位群の 1 ストローク中の各局面の割合を比較した結果, 上位群の左脚のプッシュオフ屈曲局面の割合は 27.2 ± 3.4 %となり, 下位群の 32.3 ± 4.2 %より有意に低いことが示された($p < 0.01$). また上位群の左脚のスイング局面の割合は 10.4 ± 4.3 %となり, 下位群の 5.7 ± 4.2 %より有意に高いことが示された($p < 0.05$).

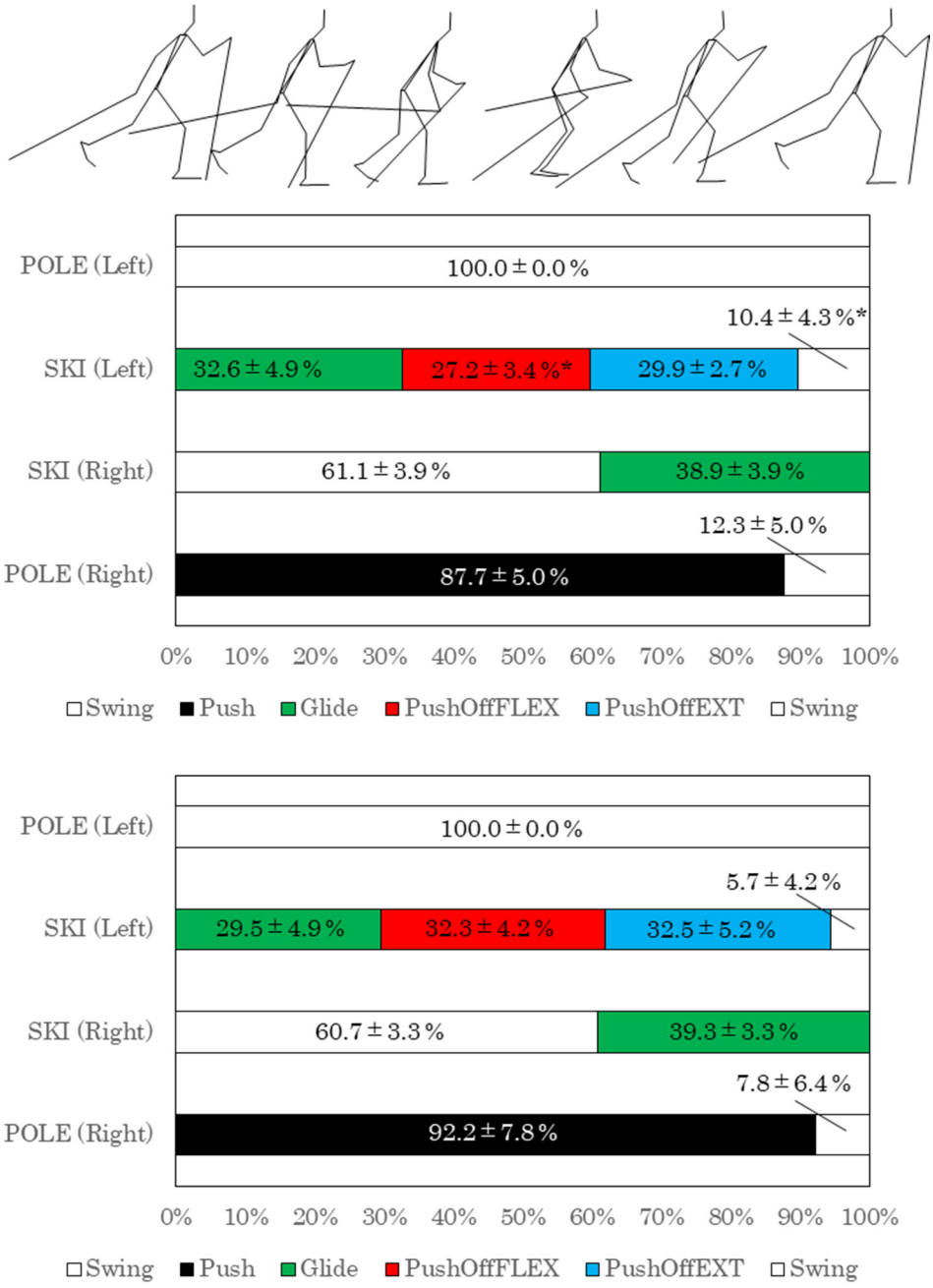

Fig.3 Phase diagram of diagonal stride technique for high (upper figure) and low (lower figure) performance group. There were significant differences between two groups.

Table1 Shoulder, elbow, pole, hip, knee and ankle angle characteristics during uphill diagonal stride technique.

Variables	HIGH	LOW	Variables	HIGH	LOW	Variables	HIGH	LOW
Shoulder angle [deg.]			**Hip angle [deg.]**			**Ankle angle [deg.]**		
Pole plant	-70 ± 12	-70 ± 5	End-gliding	112 ± 5	112 ± 4	End-gliding	120 ± 5	122 ± 5
Pole lift-off	9 ± 5	8 ± 8	Minimum	118 ± 8	121 ± 7	Minimum	88 ± 8	89 ± 5
Shoulder range of motion [deg.]			End push-off	180 ± 7	177 ± 6	End push-off	142 ± 6	138 ± 8
Extension(push-off)	79 ± 9	78 ± 9	**Hip range of motion [deg.]**			**Ankle range of motion [deg.]**		
Shoulder anglar velocity [deg./s]			Flexion(push-off)	6 ± 9	9 ± 7	Flexion(push-off)	32 ± 6	33 ± 5
Extension(push-off)	167 ± 24	161 ± 17	Extension(push-off)	63 ± 10	56 ± 9	Extension(push-off)	54 ± 9	50 ± 9
Elbow angle [deg.]			**Hip angular velocity [deg./s]**			**Ankle angular velocity [deg./s]**		
Pole plant	100 ± 11	94 ± 7	Flexion(push-off)	37 ± 62	48 ± 33	Flexion(push-off)	219 ± 53	199 ± 35
Minimum	95 ± 12	86 ± 13	Extension(push-off)	388 ± 75	331 ± 45	Extension(push-off)	332 ± 61	302 ± 97
Start knee extension	132 ± 16	112 ± 20*	**Knee angle [deg.]**					
Pole lift-off	163 ± 10	154 ± 12	End-gliding	157 ± 5	157 ± 3			
Elbow range of motion [deg.]			Minimum	121 ± 4	123 ± 6			
Flexion(push-off)	5 ± 4	8 ± 8	End push-off	158 ± 6	153 ± 4			
Extension(push-off)	37 ± 13	26 ± 20	**Knee range of motion [deg.]**					
Elbow angular velocity [deg./s]			Flexion(push-off)	36 ± 8	34 ± 5			
Flexion(push-off)	53 ± 40	78 ± 51	Extension(push-off)	37 ± 6	30 ± 5 *			
Extension(push-off)	91 ± 28	68 ± 54	**Knee angular velocity [deg./s]**					
Pole angle [deg.]			Flexion(push-off)	244 ± 61	204 ± 37			
Pole plant	78 ± 3	78 ± 3	Extension(push-off)	230 ± 51	181 ± 47*			
Pole lift-off	34 ± 3	35 ± 2						

HIGH, high-performance group; LOW, low-performance group. *: Significantly different to the HIGH.

3. 各関節の角度，動作範囲および角速度

本研究で対象としたダイアゴナル走法の 1 ストロークにおいて，右腕のプッシュ局面では，ポールの接地から離地に向かい，肩関節が徐々に伸展すること，肘関節が一度屈曲したのちに伸展することが示された(Fig.4)．上位群と下位群の 1 ストローク中の各時点の角度，動作範囲および角速度を比較した結果は Table1 に示した．その結果，上肢では上位群の左脚のプッシュオフ伸展局面開始時の肘関節角度は 132 ± 16 度となり，下位群の 112 ± 20 度より有意に高いことが示された($p < 0.05$)．

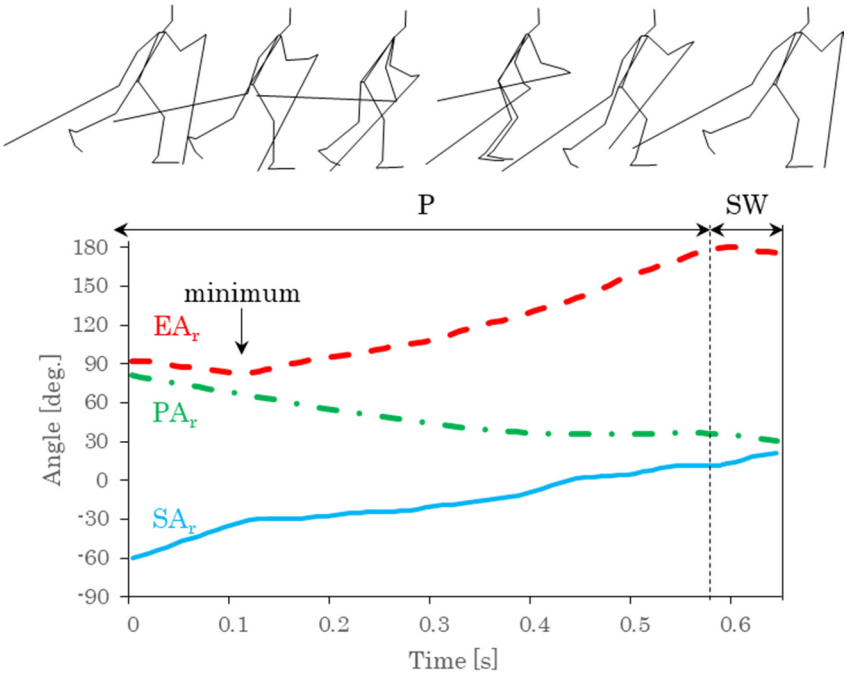

Fig.4 Typical right arm joint and right pole angle data during uphill diagonal stride technique. P: Poling phase; SW: Swing phase; SAr: Shoulder angle right side; EAr: Elbow angle right side; PAr: Pole angle right side.

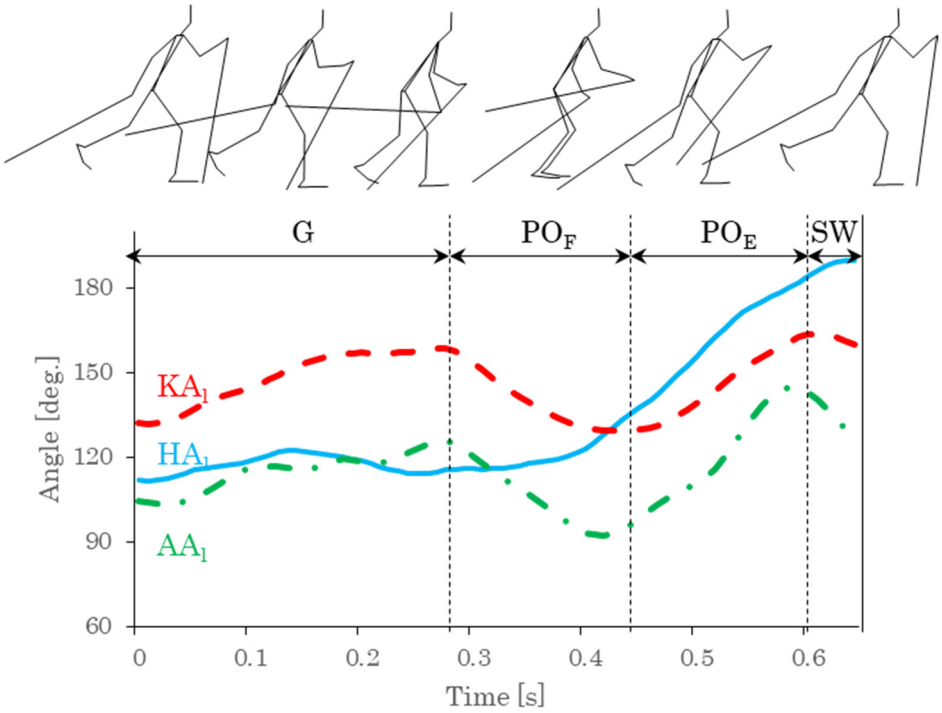

Fig.5 Typical left leg joint angle data during uphill diagonal stride technique. G: Gride phase; POF: Push-off flexion phase; POE: Push-off extension phase; HAl: Hip angle left side; KAl: Knee angle left side; AAl: Ankle angle left side.

また Fig.5 より 1 ストロークにおいて，左脚のグライド局面中，股関節，膝関節および足関節は緩やかに伸展することが示された．その後，プッシュオフ屈曲局面においては，股関節はさらに伸展する一方で，膝関節と足関節が屈曲することが示された．さらにプッシュオフ伸展局面においては，股関節の伸展に続いて，一度屈曲した膝関節と足関節が再度伸展することが示された．上位群と下位群を比較した結果，下肢では上位群の左脚のプッシュオフ伸展局面の膝関節伸展角速度は毎秒 230 ± 51 度となり，下位群の毎秒 181 ± 47 度より有意に高いことが示された（$p < 0.05$）．また，上位群の同局面の膝関節伸展動作範囲は 37 ± 6 度となり，下位群の 30 ± 5 度より有意に大きいことが示された（$p < 0.05$）．

IV．考察

1．ストローク特性

本研究では，競技パフォーマンスに優れた選手は，大きいストライド長を獲得していることが示された．一方で，ストローク頻度には競技パフォーマンスによる違いが認められなかった．これらの結果は，滑走速度の増加にストライド長が関連し，ストローク頻度があまり関連しないとする先行研究を支持する結果となった（Bilodeau et al., 1992, 1996; 藤田ら, 2014; Lindinger et al., 2009; Vähäsöyrinki et al., 2008）．滑走速度は，ストライド長とストローク頻度の積によって決定されるため，どちらか一方を増加させ，他方を維持させることによって滑走速度の増加が可能となる．これらのことは，ダイアゴナル走法において競技パフォーマンスに優れた選手が，ストライド長を大きくして高い滑走速度を獲得していることを示唆するものである．そのため，ダイアゴナル走法の技術指導やトレーニングの際には，より大きいストライド長を獲得させる方策を考案することが重要といえよう．

2．各局面の割合

本研究では，1 ストロークに要する時間の逆数であるストローク頻度に競技パフォーマンスの違いによる差はみられなかった．しかしながら局面の割合では，競技パフォーマンスに優れた選手は，

プッシュオフ屈曲局面の割合が小さく，プッシュオフ動作後のスイング局面の割合が大きいことが示された．このことは，競技パフォーマンスに優れた選手がストローク頻度を高めることよりも，1 ストロークのうちのプッシュオフ屈曲局面を短くし，プッシュオフ後のスイング局面を長くすることで高い滑走速度を獲得していることを示唆するものである．一般的にプッシュオフ屈曲局面では，股関節を伸展させつつ膝関節と足関節を屈曲させながら(Fig.5)スキーの垂直下方向（雪面方向）へ大きく加重する局面であること，スキーの後方向（進行逆方向）に力を発揮する直前の局面であること(Komi et al., 1987; Vähäsöyrinki et al., 2008) が知られている．クラシカル種目では，スキーを利用して脚を後方に伸展させるプッシュオフ動作を行い，推進力を獲得する．その際，雪面とスキーの滑走面との摩擦抵抗を高めるために，スキーの滑走面の中央付近に摩擦抵抗の大きなグリップワックスを塗布するのが一般的である．一般的にクラシカル種目用のスキーは 1000 N 以上の垂直下向きの力を加えることでグリップワックスを塗布した滑走面の中央付近と雪面が接触する仕組みとなっている (Ekström, 1981)．つまりグライド局面ではスキーの摩擦抵抗が小さい状態を維持しており，続くプッシュオフ屈曲局面でスキーの摩擦抵抗を意図的に増加させているといえる．この摩擦抵抗を増加させるために垂直下方向に発揮される力の大きさは滑走速度の増加と関連しない(Vähäsöyrinki et al., 2008)ものの，刻一刻と変化する斜度に合わせてグリップのための力を状況ごとに的確に判断して制御する必要がある（藤田ら, 2013）とされている．これらのことは，競技パフォーマンスの高い選手がプッシュオフ屈曲局面を短時間で完了させる技術を有していることを示唆するものである．

また，競技パフォーマンスに優れた選手は，プッシュオフ動作後のスイング局面の割合が大きいことが示された．先行研究によると，スイング局面はプッシュオフ動作によってスキーが離地した時点より開始され，まず後方への脚のスイング動作が行われる (Lindinger et al., 2009)．その後，反対側のポールが接地された後に前方へのスイング動作へと切り替わり，スキーの接地によって終了する．本研究では，スキーの離地から次のポールの接地までの局面の割合に差がみられ，ポールの接地からスキーの接地までの局面の割合には差がみられなかった．スキーの離地から次のポールの接地までの間は，反対側のスキーによる滑走が行われており，ポールやスキーによって推進力を獲得している局面ではない (Vähäsöyrinki et al., 2008) ことから，同局面では空気抵抗，摩擦抵抗および重力の斜面方向成分を受けて滑走速度の減少が起こる局面であるといえる．競技パフォーマンスの高い選手においては，この局面の割合が大きいにもかかわらず 1 ストローク中の平均滑走速度が高いことが示された．これらのことを踏まえると，他の局面で大きな推進力を獲得したうえで，同局面でより加速した状態でスキーをより長く滑走させることにより，大きいストライド長を獲得していることが示唆される．ダイアゴナル走法の滑走速度と強く関係しているストライド長の獲得機序の解明には，滑走速度の変化率と各局面との関係について，より詳細な研究が必要であろう．

3. 各関節の角度，動作範囲および角速度

本研究では，競技パフォーマンスに優れた選手は，プッシュオフ伸展動作開始時の肘関節をより伸展させていることが示された．一方，他の時点の肘関節角度，動作範囲および角速度には差がみられなかった．これらの結果は，ポールの接地から離地までの動作はほぼ同じであるものの，競技パフォーマンスに優れた選手は，一度肘を屈曲させてからプッシュオフ伸展開始時までに，肘を早い段階で伸展させるプッシュ動作を行っていることを示唆するものである．肩関節の動作に差がなかったことを踏まえると，パフォーマンスに優れた選手は，肘関節を伸展させてポールを倒し，進行方向への推進力を獲得させやすい角度をより早い段階で得ていたといえる．ポールのプッシュ局面においては，ポールの接地後すぐに力のピークが出現するタイプと終盤に出現するタイプがあることが知られている (Lindinger et al., 2009) が，競技レベルの違いは検討されていない．ポールのプッシュ局面中の上肢およびポールの振る

舞いと発揮される力との関係については，より詳細な研究が必要であろう．

また，競技パフォーマンスに優れた選手は，プッシュオフ伸展局面において膝関節をより“速く”“大きく”伸展させていることが示された．プッシュオフ伸展局面の割合には差がないこと，プッシュオフ伸展局面開始時の股関節，膝関節および足関節角度に差がないことを踏まえると，競技パフォーマンスに優れた選手は，プッシュオフ伸展局面において，膝関節をすばやく，且つ大きく伸展させることによって，高い滑走速度を獲得していることを示唆するものである．プッシュオフ伸展局面では，スキーに対する垂直下方向および後方向に発揮される力が増加することによって滑走速度が増加することが明らかとなっている(Vähäsöyrinki et al., 2008)．このことを踏まえると，前段階であるプッシュオフ屈曲局面ではスキーを雪面に短時間でグリップさせ，プッシュオフ伸展局面では下肢をすばやく，かつ大きく伸展させてスキーの下および後ろ方向に大きな力を加えることが，滑走速度を高めるうえで重要な技術といえよう．

結論

本研究では，クロスカントリースキー競技クラシカル種目を対象に，競技パフォーマンスに優れた選手のダイアゴナル走法のキネマティクス的特徴を明らかにした．その結果，競技パフォーマンスに優れる選手は，(1)大きいストライド長を獲得していること，(2)スキーを離地させてから同側のポールを接地させるまでの滑走時間が長いこと，(3)ポールを接地させてから比較的早い段階で肘を伸展させていること，(4)プッシュオフ動作時にスキーと雪面とをすばやくグリップさせ，その後，膝関節をすばやくかつ大きく伸展させていることが明らかとなった．

文献

- 阿江通良（1996）日本人幼少年及びアスリートの身体部分慣性係数．Japanese Journal of Sports Science 15: 155-162.
- Bilodeau, B., Boulay, M. B., and Roy, B. (1992) Propulsive and gliding phases in four cross-country skiing techniques. Medicine and Science in Sports and Exercise, 24: 917-925.
- Bilodeau B., Rundell, K. W., Roy, B., and Boulay, M. R. (1996) Kinematics of cross-country ski racing, Medicine and Science in Sports and Exercise, 28: 128-138.
- Ekström, H. (1981) Force interplay in cross-country skiing. Scandinavian Journal of Sports Sciences, 3: 69-76.
- 藤田善也（2013）クロスカントリースキー競技におけるバイオメカニクス的観点からの競技サポート．バイオメカニクス研究，17: 189-200.
- 藤田善也、吉岡伸輔（2013）クロスカントリースキーのバイオメカニクス．体育の科学，63: 227-234.
- 藤田善也、石毛勇介、吉岡伸輔、竹田正樹(2014) クロスカントリースキー競技における競技パフォーマンスとサイクル特性との関係：男子10km クラシカル競技種目を対象として．体育学研究，59: 275-282.
- Hoga, K. and Sanbongi, Y. (2010) Diagonal technique of cross-country skiing on different slopes in a classical 10 km race. International Journal of Sport and Health Science, 8: 56-66.
- Komi, P. V., Norman, R. W., and Caldwell, G. (1982) Horizontal velocity changes of world-class skiers using the diagonal technique. Exercise and Sport Biology, Human Kinetics, Champaign IL, pp. 166-175.
- Komi P. V. and Norman, R. W. (1987) Preloading of the thrust phase in cross-country skiing. International Journal of Sports and Medicine, 8: 48-54.
- Lindinger, S. J., Göpfelt, C., Stöggl, T., Müller, E., and Holmberg, H.-C. (2009) Biomechanical pole and leg characteristics during uphill diagonal roller skiing. Sports Biomechanics, 8: 318-333.
- Vähäsöyrinki P., Komi, P. V., Seppälä, S., Ishikawa, M., Kolehmainen, V., Salmi, J. A., and Linnamo, V. (2008) Effect of skiing speed

on ski and pole forces in cross-country skiing. Medicine and Science in Sports and Exercise, 40: 1111-1116.